

氏 名	大 島 亮 一 郎
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和63年10月12日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和29年3月 東北大学工学部機械工学科卒業
学 位 論 文 題 目	ジェットポンプに関する流体力学的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大場利三郎 東北大学教授 大宮司久明 東北大学教授 小林 陵二 東北大学助教授 井小萩利明

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒 論

水を駆動流体とするジェットポンプ（以下単にジェットポンプという）は、構造がきわめて単純で、全く機械的可動部が存在しないので、十分高い信頼性が期待できることから、近年、沸騰水形原子炉冷却水再循環ポンプのごく僅かの故障、不具合も致命的となる重要部分に応用されつつある。また、タービンポンプとジェットポンプを組合せたポンプは井戸水の揚水ポンプとして広く普及している。

当然のことながら、このような応用分野において、ポンプ効率の低下は全体組合せポンプ効率の著しい低下を招来するから、効率向上は不可避的な重要課題と言える。しかるに、従来のジェットポンプは、通常のターボ式ポンプに比しかなり効率が低いので、効率の飛躍的向上が切望されている。

一方、キャビテーションがジェットポンプ内に一たび発生すれば、ポンプ自体の信頼性が著しく損なわれるのみならず、原子炉内にあっては発生したキャビテーション気泡による燃料集合体あるいは熱交換部などの最重要部にもきわめて重大な結果を招来することになる。また、井戸ポンプにおいては揚水量の減少、騒音の発生の主要原因となることから、この種のキャビテーションの挙動の詳細な解明も待望されている。

よって、本研究では、ジェットポンプ内の水力損失の割合を解析し、のど部内の混合損失が最大割合を占めることをまず明らかにし、のど部適正長さの算定式を理論的ならびに実験的に検討し、同最適長さのレイノルズ数依存性を解明した。次いで、ターボ式ポンプとジェットポンプとの組合

せポンプの効率と各構成ポンプ効率との関係、それらの特性推定法などについて詳細な検討を行い、キャビテーション性能がきわめて優秀なポンプ組合せ方式を見出し得た。

ジェットポンプのキャビテーション特性解明に当たり、二つの相似物体まわりのキャビテーション流れが流体力学的に相似となる必要条件を、球状気泡の方程式を基に探究し、初生キャビテーション係数 K_d に関わる諸無次元量、すなわち、表面圧力係数、レイノルズ数、表面張力、寸法比などの関係式を求め、寸法の異なる回転対称物体まわりのトラベリングキャビテーションの実験結果が良く説明されるとともに、Knapp 教授の寸度効果則がこの理論の一特殊解となっていることなどを明らかにした。

上記の結果を踏まえ、ジェットポンプに発生するキャビテーションの初生点とキャビテーションによる特性低下点とをのど部径の異なる3種のポンプについて、種々の流体力学的条件の下に解明するとともに、既存のデータと対比して、初生点ならびに性能低下点の予測法に関する種々の有用な結論を得た。

第2章 ポンプの相似則

ジェットポンプは、ジェット用ノズル、のど部およびディフューザ部とから成っているが、ポンプ効率 η_j に大きな影響を与えるのはのど部の混合損失であり、損失割合の解析結果ではポンプ入力約50%にも達することが明らかとなった。次いで、のど部径が8.3~100mmのポンプ実験より、のど部最適長さ l_{23opt} の Re 数依存性が明らかとなった。ここで、軸対称単純モデルによるのど部内部流れの解析より、 l_{23opt} と Re 数との間に

$$l_{23opt}/dt = A \log Re + B$$

ここに dt = のど部径 A, B = 定数

なる関係が成立し、この関係は上記実験とも定量的によく一致することを明らかにした。なお、適用範囲は $10^5 < Re < 10^7$ である。また、新たに導入した特性数

$$Y = (1 + M) / \sqrt{R} \{ 1 / R - M / (1 - R) \}$$

ここに、 M = 吸込流量 / 駆動流量、 $R = (dm/dt)^2$ 、 dn = ノズル径

はポンプ最高効率点付近で、ポンプの種類と大きさに依らずほぼ $Y = 1.75$ であることを実験的に明示した。

第3章 ターボ式ポンプとの組合せ特性

ジェットポンプとターボ式ポンプとの組合せ方式を大別すれば、ターボ式ポンプの上流に設置する方式と下流に設置する方式とがあり、各々目的を異にする。本章では、組合せポンプ特性の一般的知見を得るため、上、下流に図1の如く各1台のジェットポンプ ($J P_1$, $J P_2$) を設置した特殊組合せ (以下、上下流設置方

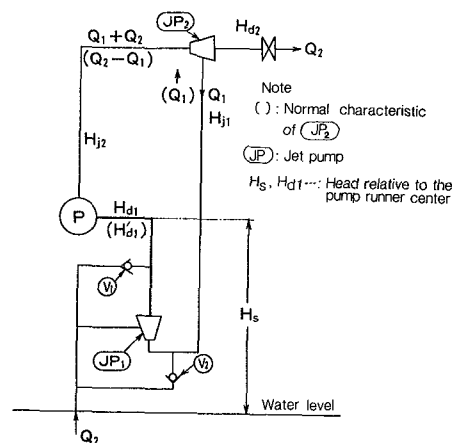


図1 上下流設置方式のポンプ構成と記号

式という) ポンプを対象に、特性解析とキャビテーション性能実験を行うとともに、上流設置方式に関し各単独ポンプが組合せ特性に与える効果の定量的説明を行った。なお、図中 P がターボ式ポンプ、 V_1 、 V_2 は逆止弁、Q、H は流量、揚程を示す。

吸入揚程 $H_s = -6$ m において、上下流設置方式と上流設置方式組合せポンプの特性を比較した結果、前者の大揚水量時のキャビテーション性能が向上し、水量増加は30%に達した。

また、これら組合せポンプの特性推定法を検討し、実験値とよく一致することを確認した。

上下流設置方式の特性解析結果によれば、図1中の $J P_2$ 吸込管から逆流する場合の組合せ効率 η_c は

$$\eta_c = \eta_p (\eta_{j1} + M_1) / (1 + M_1)$$

ここに、 η_p = ターボポンプの単独効率、 $M_1 = Q_2 / Q_1$ 、 $\eta_{ji} = J P_1$ の効率で表わされ、 $J P_2$ が正常に作動する正流特性の場合(図1中の()記号)では

$$\eta_c = \eta_p (\eta_{j2} + N_2) / (1 + N_2)$$

ここに、 $\eta_{j2} = J P_2$ の効率、 $N_2 = (H_{d2} - H_{i1}) / (H_{j2} - H_{d2})$

で表わされる。

第4章 キャビテーション初生の寸度効果

キャビテーション初生の寸度効果に関する説明は、水力機械の模型試験結果から実物機械のキャビテーション初生の予測に関して何らかの知見を加え得る。周知のように、キャビテーション初生時のキャビテーション係数 K_d は、 Re 数によりその値を異にする。既に、この命題に関する諸量を探り上げた理論的研究も行われ、 K_d の値を支配する諸量の影響の理論値は実験値と定性的には大体一致する結果を得ているが、定量的には満足すべき一致を得ているとは認められない。本章では、幾何学的相似な回転対称体における初生キャビテーション係数と Re 数との関係を明らかにするため、気泡に関する運動方程式より気泡運動の力学的相似則を導き、これに基づいて流速、および物体の大きさを変数とする初生キャビテーション係数の関数関係を求めた。すなわち、次式

$$\{Kd_1 + Cp + (2 \sigma_1 / R_1 / \frac{1}{2} \rho_1 V_1^2)\} \bar{R}_2^2 L_1^2 = \{Kd_2 + Cp + 2 \sigma_2 / R_1 / \frac{1}{2} \rho_2 V_2^2\} \bar{R}_1^2 L_2^2$$

ここに、 $L_{1,2}$ = 物体の代表長さ、 $\bar{R}_{1,2}$ = 気泡半径、 Cp = 表面圧力係数

$\sigma_{1,2}$ = 液体の表面張力、 $V_{1,2}$ = 物体無限遠方の流速、 $Kd_{1,2}$ = 初生キャビテーション係数

により K_d に及ぼす寸度効果を計算できる。なお、 R の値として初生点における境界層排除厚さの $1/2$ をとり、表面圧力係数 Cp は Re 数によらず一定と仮定した。

本計算結果と Kermeen 等による半球体の実験結果 ($L = 3/8 \sim 8$ ", $Re = 10^5 \sim 10^7$) の K_d 値は比較的良く一致しており、また Knapp により提唱された

$$(Kd_1 + Cp_{min}) \sqrt{L_1 V_1} = (Kd_2 + Cp_{min}) \sqrt{L_2 V_2}$$

は、本理論式中の表面張力を省略し、 Cp に最小圧力係数 Cp_{min} を用い、境界層は前部岐点より乱流と仮定したモデルに類似していることになり、本理論の特殊な場合に相当することを明らかにし

た。

第5章 ジェットポンプのキャビテーション性能

ジェットポンプに発生するキャビテーションの予測は、設計上重要な問題であり、各種運転条件に対する騒音、壊食あるいは特性低下との関連性の解明が今後の重要課題であり、各国で地道な関連研究が行われているが、いずれも特定ポンプのみの検討に留まっているのが現状である。従って、寸法効果、水温、空気含有度等がキャビテーションの発生にどの程度影響するのか等の信頼し得る所見は得られておらず、実物あるいは模型実験からこれを推定する域を脱していない。幸いにして、これらポンプ通路は環状あるいは円筒状であり、水力機械にみられる翼形の寸法効果のようにキャビテーションの発生に微妙に影響するものはあまりないため、その発生に対しての相似則がある範囲内で成立する可能性が期待できる。よって、本章では、のど部径 d_t が 10.2, 50.8, 101.6 mm の3種類のポンプを対象に、キャビテーションの初生点およびキャビテーションによる特性低下開始点を種々の流体力学的条件下に解明するとともに、既存の同種データと比較検討した。検討に先立ち、既発表の各種キャビテーション係数につき比較した結果、いずれのキャビテーション係数も比較的簡単な関数関係で結ばれていることが判明したため、本章では

$$\omega = 2(P_s - P_v) / \rho U_n^2$$

ここに、 P_s : 吸込揚程、 P_v : 流体の飽和蒸気圧、 U_n : ノズル出口平均流速をもってキャビテーション係数と定義し、初生点のそれを ω_i 、特性低下開始点のそれを ω_c とした。

図2は、 $T = U_s / U_n$ に対する ω_i 、 ω_c を d_t 別に対比したもので、図中斜線部は実験値のばらつき範囲を示したものである。この結果から、 ω_i と ω_c は T の大きな領域ではほぼ一致するが T の小さな領域では顕著な差が現れる。また ω_i に与える寸法効果は顕著であり、口径が大きくなるほど ω_i は大となるが、 R の影響は少ない。しかし ω_c に対する口径および R の影響はともに僅少であることが言える。

第6章 結 論

ジェットポンプにおける目下の主要課題であるポンプ設計法、寸法則およびキャビテーション性能について種々の流体力学的条件の下に理論的ならびに実験的検討を行い、それぞれ新しい有益な知見を得ることができた。

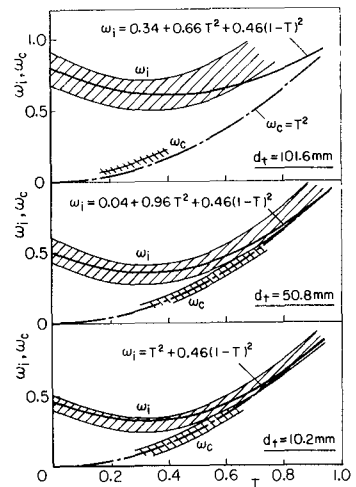


図2 ω_i 、 ω_c の計算値と実験結果の対比

審 査 結 果 の 要 旨

ジェットポンプは、機械的可動部がないので十分信頼性が高く、他のポンプとの組合せ制御特性も優れていることから、原子炉冷却水再循環系等のように極く僅かの故障、不具合も致命的となる重要分野に多用されているが、その低い効率の改善が緊急重要課題とされている。また、このポンプ内にひとたびキャビテーションが発生すれば、ポンプ自体の信頼性が著しく損なわれるばかりでなく、燃料集合体あるいは熱交換器などの主要部にも安全上極めて危険な影響を及ぼすから、このキャビテーションの挙動の解明も待望されている。本論文は、このようなジェットポンプについての詳細な系統的流体力学的研究の成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、ポンプ内の水力損失割合の解析より、のど部内の混合損失が最大割合を占めることをまず明らかにし、次いで、この事実を踏まえた実験ならびに理論から、のど部最適長さの式、および、そのレイノルズ数依存性等のポンプの設計に不可欠な重要な知見を導いている。そして、最高効率40%という画期的に優秀なポンプの開発に成功している。

第3章では、駆動エネルギー源であるターボ式ポンプの全揚程増加あるいはキャビテーション性能の向上を目的として、ターボ式ポンプとジェットポンプとの組合せ特性、特に揚程、流量特性の向上に関する実験的ならびに理論的研究を行い、組合せポンプの特性推定法を確立すると共に、キャビテーション性能が優れたポンプ組合せ方式を見出している。これは、極めて有用な結果である。

第4章では、相似なポンプに対する初生キャビテーション係数の寸度効果の解明を行っている。キャビテーション核から成長するキャビテーションを伴う高速流れが流体力学的に全く相似になる条件を探究し、初生キャビテーション係数に係わる諸無次元量、すなわち、表面圧力係数、レイノルズ数、ウェーバ数、無次元時間、寸法比等の関係（いわゆる Knapp-大島の法則）を導いた。これは、寸度効果に関するその後の研究の基盤となる重要な知見である。

上の諸章の結果を踏まえて、第5章では、ジェットポンプに発生するキャビテーションの初生点とキャビテーションによる特性低下点を、のど部直径が異なる3種のモデルポンプについて種々の流体力学的条件のもとに詳細に解明し、初生点ならびに特性低下点の予測法を確立している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、ジェットポンプの水力特性ならびにキャビテーション特性を理論的ならびに実験的に詳細に解明したもので、流体力学ならびに流体機械学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。